

Виктор Алексеевич Зверев

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: post_vaz@rambler.ru

Ирина Николаевна Тимошук

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: tim_ir@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

УДК 535.317.6

Е. В. ЕРМОЛАЕВА, В. А. ЗВЕРЕВ, Ю. А. ПОДГОРНЫХ
**ВАРИАНТЫ ЗЕРКАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
С ГЛАВНЫМ ЗЕРКАЛОМ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**

Рассматриваются варианты зеркальных систем, построенных на основе применения афокальной системы из двух отражающих поверхностей с использованием преобразования систем Грегори и Кассегрена.

Ключевые слова: *зеркальная система, отражающая поверхность, афокальная система.*

Входным зрачком крупногабаритных телескопов, как правило, является оправа главного зеркала, форма отражающей поверхности которого, исходя из соображений практической реализации при существующем уровне технологии изготовления, должна быть сферической. Как показано в работе [1], афокальная система, состоящая из главного зеркала сферической формы и вторичного зеркала, поверхность которого эквидистантна параболоиду, формирует строго стигматичное изображение осевой точки при достаточно большом отступлении от условия синусов. Для эффективной компенсации этого отступления с помощью последующей зеркальной системы афокальная система, предложенная Д. Т. Пуряевым [1], должна быть кеплеровского типа [2], т.е. иметь промежуточное изображение, как показано на рис. 1.

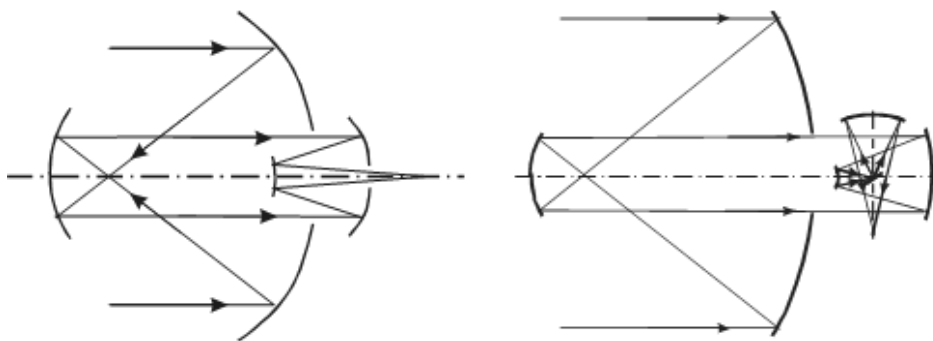


Рис. 1

Проф. М. М. Русиновым было установлено, что если изображение, образованное объективом Грегори, расположить в плоскости, проходящей через вершину отражающей поверхности главного зеркала, то изображение этого зеркала будет сформировано вторичным зеркалом в плоскости промежуточного изображения, образованного отражающей поверхностью главного зеркала [3, 4]. Если при этом отражающую поверхность главного зеркала принять в качестве входного зрачка объектива, то его изображение в плоскости промежуточного изо-

бражения будет выходным зрачком рассматриваемой оптической системы. В этом случае в выходной зрачок системы можно поместить дополнительную отражающую поверхность (рис. 2).

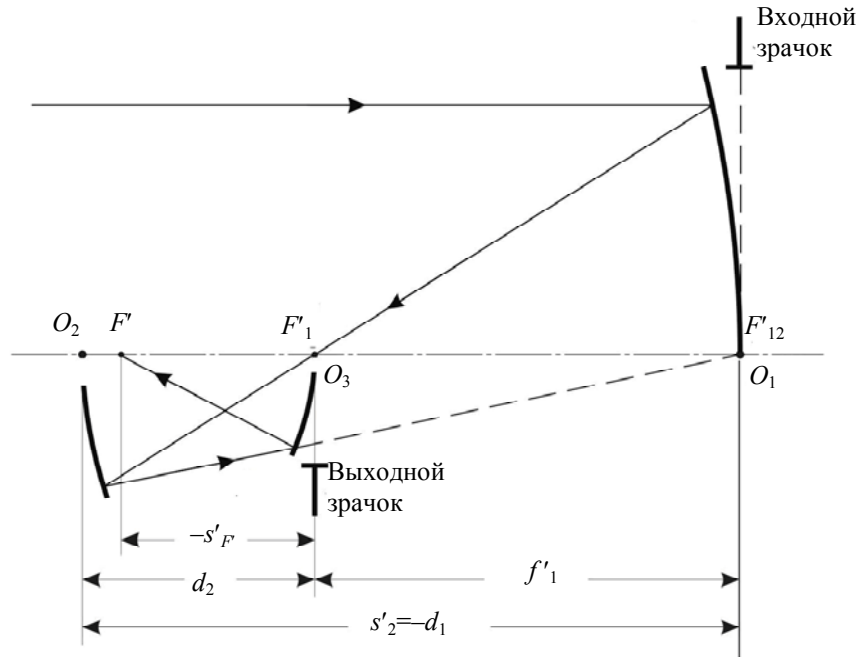


Рис. 2

Выразив линейные величины в масштабе фокусного расстояния системы, получим: $h_1 = 1$; отношение $h_2 / h_1 = h_2 = -k_s$ определяет коэффициент центрального экранирования зрачка (осевого пучка лучей) по диаметру; задний фокальный отрезок $s'_{F'} = -k_s d_2$. Коэффициент экранирования k_s ($k_s > 0$) — величина известная (задана или выбрана); значение коэффициента k_s выбирается из конструктивных соображений.

Сферическая aberrация, кома и астигматизм третьего порядка изображения в общем случае определяются следующими коэффициентами [5, 6]:

$$S_I = \sum_{i=1}^3 h_i Q_i; \quad S_{II} = \sum_{i=1}^3 H_i Q_i - J \sum_{i=1}^3 W_i;$$

$$S_{III} = \sum_{i=1}^3 \frac{H_i^2}{h_i} Q_i - 2J \sum_{i=1}^3 \frac{H_i}{h_i} W_i + J^2 \sum_{i=1}^3 \frac{v_{i+1} \alpha_{i+1} - v_i \alpha_i}{h_i},$$

где $Q_i = P_i + T_i \sigma_i$; σ_i — коэффициент „деформации“ сферической поверхности в уравнении $x^2 + y^2 = 2r_i z - (1 + \sigma_i) z^2$; $J = n' \alpha' l'$ — инвариант Лагранжа — Гельмгольца, здесь $n' = -1$, $\alpha' = 1$, $l' = f' \beta_1$; при $\beta_1 = 1$ в масштабе фокусного расстояния имеем $J = -1$.

Выражения, определяющие коэффициенты первичных aberrаций изображения, образованного рассматриваемой оптической системой, можно представить в виде

$$S_I = \sum_{i=1}^3 h_i P_i + T_1 \sigma_1 - k_s T_2 \sigma_2 - \frac{k_s}{1 + k_s} T_3 \sigma_3, \tag{1}$$

$$S_{II} = -\frac{1}{k_s} (P_2 + T_2 \sigma_2) + \sum_{i=1}^3 W_i, \tag{2}$$

$$S_{III} = -\frac{1}{k_s^2 k_s} (P_2 + T_2 \sigma_2) + \frac{2}{k_s k_s} W_2 + 1 + 2k_s (1 + k_s) + \frac{1 + k_s}{k_s}. \tag{3}$$

Коррекционными параметрами в рассматриваемой оптической системе являются коэффициенты деформации отражающих поверхностей: σ_1, σ_2 и σ_3 . Из выражений (2) и (3) следует, что подбором коэффициента σ_2 можно компенсировать или остаточную кому, или астигматизм. Следовательно, зная три коррекционных параметра, можем компенсировать лишь две aberrации из трех. Раскрыв величины, входящие в выражения, определяющие коэффициенты S_I и S_{II} [6], при $S_{II} = 0$ получим

$$\sigma_2 = \frac{2 - k_s^2(2k_3 - 1)}{k_s^2(2k_3 - 1)^3},$$

при этом коэффициент S_I определяется выражением

$$S_I = \frac{1}{4} k_s^3 (1 - k_3)^3 (1 + \sigma_1) - \frac{1 - 2k_3}{2} k_s^3 k_3 - \frac{1}{4} \frac{1 - k_s^2 k_3^2}{1 - k_3} (1 - k_s k_3) k_3 \left[1 - \frac{(1 + k_s k_3)^2}{(1 - k_s k_3)^2} \sigma_3 \right].$$

Отсюда следует, что при $S_I = 0$ коэффициенты деформации могут принимать и такие значения, как $\sigma_1 = 0$ при $\sigma_3 \neq 0$ или $\sigma_3 = 0$ при $\sigma_1 \neq 0$.

Очевидным достоинством рассматриваемой оптической системы (см. рис. 2) является то, что при апланатической коррекции aberrаций главное зеркало может иметь сферическую форму, а недостатком — расположение приемника изображения на большом расстоянии от главного зеркала.

Альтернативной этой оптической системе может быть система, схема которой представлена на рис. 3. Из габаритных соотношений следует, что коэффициент экранирования светового пучка лучей плоским зеркалом равен $k_3 = 1 + d_p \varphi_1$, где d_p — расстояние от главного зеркала до плоского; $\varphi_1 = -2/r_1$ — оптическая сила главного зеркала. Заметим, что в данной оптической системе плоское зеркало выполняет функцию лишь габаритного элемента.

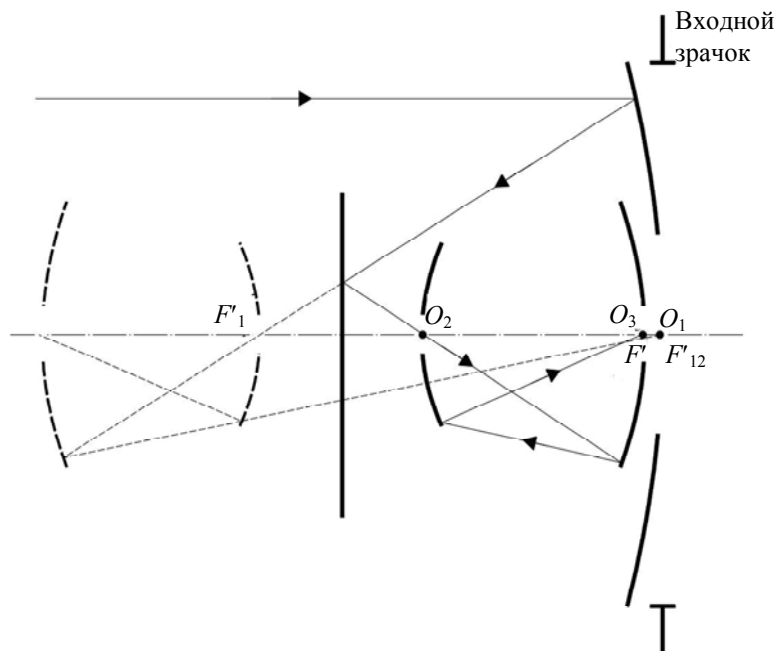


Рис. 3

Для расширения коррекционных возможностей систему, состоящую из главного и плоского зеркал, заменим системой из двух отражающих поверхностей типа оптической системы Кассегрена (рис. 4). При этом апертурной диафрагмой может служить отражающая поверхность как первого, так и второго зеркала.

Рассмотрим вариант композиции оптической системы, когда апертурной диафрагмой является отражающая поверхность главного зеркала. На эту же поверхность проецируется ее изображение, образованное второй и третьей отражающими поверхностями системы, как показано на рис. 4.

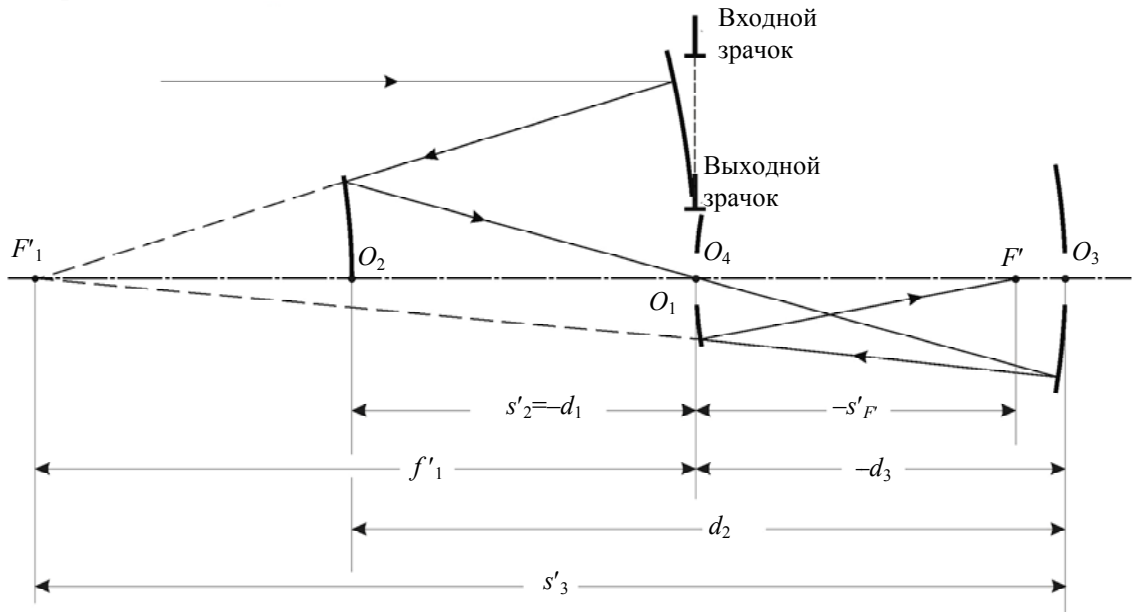


Рис. 4

Пусть $s'_2 = -d_1$, $s'_{F'} = -k_s d_3$, а $d_3 = k_1 d_1$. В результате параметрического анализа рассматриваемой композиции зеркальной оптической системы получены соотношения, которые можно представить последовательностью

$$d_1 = -\frac{1}{k_s} \frac{k_3}{1 + k_1(1 - k_3)}; \quad \alpha_2 = \frac{k_3 - 1}{d_1}; \quad d_2 = -(1 + k_1)d_1; \quad \alpha_3 = \frac{k_3}{d_1};$$

$$d_3 = k_1 d_1; \quad \alpha_4 = \frac{k_1 k_3}{d_1} \frac{1 - k_3}{1 + k_1(1 - k_3)}; \quad s'_{F'} = \frac{k_1 k_3}{1 + k_1(1 - k_3)}.$$

Первичные aberrации изображения, образованного рассматриваемой системой, определяются коэффициентами

$$S_I = \sum_{i=1}^4 h_i P_i - T_1 \sigma_1 - k_3 T_2 \sigma_2 + k_1 k_3 T_3 \sigma_3 + \frac{k_1 k_3}{1 + k_1(1 - k_3)} T_4 \sigma_4, \quad (4)$$

$$S_{II} = -\frac{1}{k_s} \frac{k_3}{1 + k_1(1 - k_3)} (P_2 + T_2 \sigma_2) - \frac{1}{k_s} (P_3 + T_3 \sigma_3) - \sum_{i=1}^4 W_i, \quad (5)$$

$$S_{III} = -\frac{1}{k_s^2} \frac{k_3}{[1 + k_1(1 - k_3)]^2} (P_2 + T_2 \sigma_2) + \frac{1}{k_1 k_s^2 k_3} (P_3 + T_3 \sigma_3) - \frac{2}{k_s [1 + k_1(1 - k_3)]} W_2 +$$

$$+ \frac{2}{k_1 k_s k_3} W_3 + k_s \frac{1 - k_3}{k_3} + \frac{1 + k_1(1 - k_3)}{k_s^2} \left[k_s (2k_3 - 1) + \frac{1 + k_s}{k_1} k_3 \right]. \quad (6)$$

Положив в выражениях (5) и (6) коэффициенты $S_{II} = 0$ и $S_{III} = 0$, получим систему из двух уравнений, решив которую, найдем значения коэффициентов σ_2 и σ_3 . Подставив найденные значения коэффициентов в формулу (4), получим уравнение с неизвестными коэффициентами σ_1 и σ_4 . Отсюда следует, что коэффициенты деформации могут принимать и такие значения, как $\sigma_1 = 0$ при $\sigma_4 \neq 0$ или $\sigma_4 = 0$ при $\sigma_1 \neq 0$. Очевидным достоинством рассматриваемой

оптической системы (см. рис. 4) является то, что при анастигматической коррекции аберраций главное зеркало может иметь сферическую форму.

Кривизна поверхности изображения определяется коэффициентом

$$S_{IV} = \sum_{i=1}^4 \frac{v_i \alpha_{i+1} - v_{i+1} \alpha_i}{h_i} = -\alpha_2 - \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{h_2} + \frac{\alpha_3 + \alpha_4}{h_3} - \frac{1 + \alpha_4}{h_4}.$$

Заменяя углы и высоты определяющими их выражениями, получим

$$S_{IV} = -\frac{1}{k_s} \frac{k_3}{1 + k_1(1 + k_3)} \left[\frac{(1 + 2k_1)k_3 - k_1}{k_1 k_3} + \frac{1 - k_3}{1 + k_1(1 - k_3)} \right] - \frac{1 + k_1(1 - k_3)}{k_1 k_3}. \quad (7)$$

Рассматриваемая система имеет вполне конструктивный вид, если принять $k_1 = k_s = 1$.

При этом при $S_{IV} = 0$ выражение (7) приобретает следующий вид: $k_3^2 - 2k_3 + \frac{1}{4} = 0$. Этому уравнению удовлетворяет решение $k_3 = 0,134$. Таким образом, в рассматриваемой системе возможна компенсация не только сферической аберрации, комы и астигматизма, но и кривизны поверхности изображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Piryayev D. T.* Afocal two-mirror system // *Optical Engineering*. 1993. Vol. 32, N 6. P. 1325—1327.
2. *Зверев В. А., Бахолдин А. В., Гаврилюк А. В.* Оптическая система высокоапертурного телескопа // *Оптич. журн.* 2001. Т. 68, № 6. С. 6—14.
3. *Русинов М. М.* Несферические поверхности в оптике. М.: Недра, 1973. 296 с.
4. *Русинов М. М.* Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
5. *Слюсарев Г. Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
6. *Зверев В. А.* Основы геометрической оптики: Учеб. пособие. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. 218 с.

Сведения об авторах

- Елена Владимировна Ермолаева** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: ermolena@yandex.ru
- Виктор Алексеевич Зверев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: post_vaz@rambler.ru
- Юлия Александровна Подгорных** — студентка; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: julijapdg@gmail.com

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
07.02.13 г.